

ВОЗМОЖНОСТЬ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ РЕЗОНАНСОВ ПРИ ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЯХ

К.Н. Проскуряков¹, М.В. Запорожец¹, А.И. Федоров²

¹ **Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Москва, Россия,** ² **Нововоронежская АЭС, г. Нововоронеж, Россия**

В НИУ «МЭИ» с середины 1960-х годов ведутся исследования теплогидравлического возбуждения акустических колебаний теплоносителя во внутрикорпусных устройствах ЯЭУ и методов их идентификации. В статье [1], обоснована возможность возникновения теплогидравлической неустойчивости типа автоколебаний в одиночном парогенерирующем канале и их влияния на уменьшение величины критического теплового потока при увеличении длины испарительного участка. Статья переведена на английский язык и опубликована в США, её содержание нашло отражение в работе [2], в которой систематизированы публикации, внесшие новые знания в изучение кризисов кипения и критических тепловых потоков.

В статье [1] обоснована физическая природа возникновения автоколебаний скорости потока в одиночном парогенерирующем канале, частота которых является собственной частотой колебаний содержащейся в нём текучей среды. Показано что сильное уменьшение величины критического теплового потока происходит при большом паросодержании и обусловлено увеличением длины испарительного участка.

Именно этот эффект, как установлено в [3] привел к разрушению реактора на Чернобыльской АЭС. «Продолжающееся снижение расхода воды через ТК реактора в условиях роста мощности привело к интенсивному парообразованию, а затем к кризису теплоотдачи, разогреву топлива, его разрушению, бурному вскипанию теплоносителя, в который попали частицы разрушенного топлива, резкому повышению давления в ТК, их разрушению и тепловому взрыву, разрушившего реактор и часть конструкций здания и приведшему к выбросу активных продуктов деления во внешнюю среду».

В работах [4, 5] впервые показано, что если при увеличении скорости двухфазного потока сила трения уменьшается, то это приводит к самовозбуждающимся колебаниям давления. Такие условия возникают при работе парогенерирующего канала в диапазоне массовых расходов, соответствующих падающему участку гидродинамической характеристики. Этот феномен необходимо учитывать в качестве главного фактора, вызывающего многократное увеличение динамических нагрузок на оборудование при протекании максимальной проектной аварии (МПА) на АЭС с ВВЭР.

В более поздних публикациях [6 – 8] отмечается влияние этого эффекта на колебания трубопроводов и надежность парогенераторов.

В МЭИ (ТУ) с середины 1970-х годов ведутся исследования термогидравлических источников возмущений и методов их идентификации. К ним относится публикация [9], в которой впервые было показано, что частота пульсаций давления теплоносителя в аварийном режиме при наличии кипения в активной зоне реактора в несколько раз меньше частоты, соответствующей режиму нормальной эксплуатации. Это изменение в спектре пульсаций давления является диагностическим признаком кипения в активной зоне реакторов типа ВВЭР и PWR. Авария на АЭС «Три - Майл Айленд-2» (ТМІ) произошла после появления данной информации. Американские исследователи после аварии отмечали, что если бы был установлен в первом контуре датчик пульсаций давления теплоносителя, позволявший фиксировать изменение спектра пульсаций давления, то персонал АЭС ТМІ своевременно заметил бы начало кипения в активной зоне и принял бы правильные решения для предотвращения одной из самых тяжелых аварий на АЭС. В этой же работе предложена акустическая модель компенсатора давления используемого на АЭС с ВВЭР (и их зарубежных аналогах- PWR), согласно которой компенсатор давления представляет собой

резонатор Гельмгольца нескольких акустических волн. Через несколько лет эта модель, была использована для расчета одной из этих частот [10 – 12].

Важным этапом в развитии методов анализа акустических систем теплоносителя в АЭС явилось обоснование правомерности электроакустических аналогий для одномерного пульсирующего потока двухфазной среды, как с однозначной, так и многозначной гидродинамической характеристиками [15]. С учетом принятого допущения, что звуковое давление ΔP во всех точках по длине канала является только функцией времени, уравнения неразрывности и сохранения количества движения одномерного пульсирующего потока двухфазной среды получены в виде системы линейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial W}{\partial x} + C_a \frac{\partial \Delta p}{\partial t} + G_a \Delta p = 0 \\ \frac{\partial \Delta p}{\partial x} + m \frac{\partial W}{\partial t} + R_a W = 0 \end{cases}$$

Здесь Δp – звуковое давление — давление, дополнительно возникающее при прохождении звуковой волны в жидкости, в паре или в пароводяной среде. Распространяясь в текучей среде, звуковая волна образует сгущения и разрежения, которые создают добавочные изменения давления по отношению к среднему статическому давлению P . W – объемный расход теплоносителя в трубе; L –длина трубы; S – поперечное сечение трубы; $C_a = \frac{L \cdot S}{k \cdot p} \approx \frac{L \cdot S}{\rho a^2}$, – акустическая податливость среды; $R_a = \zeta \rho W \frac{L}{d}$, – активное сопротивление потока среды; $G_a = \frac{1}{k} \frac{W \cdot L}{p}$, –волновая проводимость среды; $m = \frac{\rho L}{S}$ – акустическая масса; плотность двухфазной среды ρ ; ζ — суммарный коэффициент потерь энергии.

Эти уравнения известны в литературе под названием телеграфных уравнений [16]. Решение системы линейных дифференциальных уравнений дает функциональные зависимости звукового давления и объемного расхода сжимаемой среды в трубопроводе с распределенными постоянными акустической податливостью среды, акустической массы, волновой проводимостью среды, активным сопротивлением потока среды от переменных x (расстояние по оси трубопровода) и t (время).

Для расчета собственной частоты колебаний давления теплоносителя в парогенерирующем канале в [15] получено следующее соотношение:

$$f = \frac{a}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{ДФ}}{\rho_B}} \cdot (L_B \cdot L_{ДФ})^{-0.5}$$

где $\rho_{ДФ}$ - плотность теплоносителя в двухфазной области, ρ_B - плотность теплоносителя в однофазной области, L_B - длина участка однофазным теплоносителем; $L_{ДФ}$ - длина участка с двухфазным теплоносителем; a - скорость звука; f –собственная частота колебаний давления теплоносителя (СЧКДТ).

Разработанные в [15] методы расчета акустических параметров теплоносителя в парообразующих каналах активной зоны ядерного реактора и в акустических системах АЭС, с однофазной и двухфазной средами, позволяют учитывать влияние на скорость звука, a , следовательно, и на частоту АСВ, давления, температуры, паросодержания и скоростей движения фаз в потоке. Эти методы достаточно просты и эффективны при определении акустических свойств сложных систем с несколькими степенями свободы, дают результаты с точностью достаточной для решения практических задач [16]: определения частот АСВ, добротности акустических контуров теплоносителя, полосы пропускания, волнового сопротивления и пр. Методы могут быть применены для прогнозирования и предотвращения возникновения виброакустических резонансов в оборудовании АЭС в эксплуатационных и аварийных режимах, а также при сейсмических и ударных воздействиях.

В [16] показано, что расчетные значения частот АСВ, полученные при использовании метода электроакустических аналогий, разработанного для анализа акустических систем с

двухфазной текучей средой [15], совпадают с результатами измерений колебаний давления теплоносителя в парообразующих каналах активной зоны ядерного реактора. Экспериментальное доказательство, приведенное в [16], правомерности использования метода электроакустических аналогий для расчета частот АСВ в кипящих реакторах, в настоящее время приобретает особое значение для повышения конкурентоспособности и безопасности российских АЭС. Прогнозирования частот АСВ и управление ими, различных этапах аварийных режимов с кипением теплоносителя в активной зоне, позволит оптимизировать системы аварийного охлаждения реактора и уменьшить капитальные затраты на сооружение АЭС.

Разработанные методы и алгоритмы расчета АСВ имеют ясный физический смысл, позволяют проводить идентификацию источников генерации АСВ по результатам измерений вибраций оборудования и пульсаций давления теплоносителя на АЭС в эксплуатационных и аварийных режимах.

Следует отметить, что повышенные вибрации и соударения ТВС и стенок канала наблюдались в процессе эксплуатации реакторов Чернобыльской АЭС. Персоналом ЧАЭС был зафиксирован шум от соударения металлических элементов активной зоны в ряде эксплуатационных режимов. В связи с необходимостью диагностирования условий возникновения такого рода соударений и их предотвращения, на основе результатов полученных в работах [1, 4, 5, 15], по инициативе ЧАЭС в 1985 году был заключен договор между МЭИ и ВНИИАЭС «Исследования влияния потока теплоносителя на виброакустические характеристики технологических каналов реактора РБМК для разработки систем диагностики методами неразрушающего контроля основного и вспомогательного оборудования АЭС». Научными руководителями данной работы от кафедры АЭС был К.Н.Проскуряков, а от кафедры АСУТП В.С.Мухин. Работы по измерению динамического состояния оборудования предполагалось начать в мае 1986 г. После аварии на ЧАЭС 26 апреля 1986 г. доцент К.Н. Проскуряков был привлечен в качестве эксперта к работе Правительственной комиссии по расследованию причин аварии. В представленном им экспертном заключении были указаны следующие вероятные причины аварии: недопустимый рост паросодержания в технологических каналах, привел к развитию автоколебаний теплоносителя, кризису теплообмена [1] и, весьма вероятно, возникновению виброакустического резонанса с колебаниями ТВС, вызвавшего разгерметизацию технологических каналов. В заключении было указано также на недопустимое отставание в области технической диагностики АЭС от Венгрии и ГДР. В качестве неотложных мер было предложено сформировать службы технической диагностики на всех АЭС, а в МЭИ создать: а) новую специализацию «Техническая диагностика и безопасность АЭС» для подготовки кадров, и б) создать материальные условия для форсирования исследований в области шумовой диагностики оборудования и технологических процессов АЭС.

Согласно поручению Совета министров СССР, № ПП-8768 от 18.05.86 первым лицам министерств и ведомств, работающих по атомной тематике, эти предложения были рассмотрены. Особенно большое значение имел ответ министра среднего машиностроения СССР Ефима Павловича Славского. В его ответе было сказано, что предполагаемый экспертом сценарий аварии, вполне вероятен, что следует одобрить в целом сделанные предложения, оказать необходимую поддержку МЭИ для подготовки кадров и форсирования исследований в области шумовой диагностики оборудования и технологических процессов АЭС.

Госатомнадзором СССР в Совет Министров с учетом консультаций со специалистами ИАЭ им. И.В. Курчатова и НИИ энерготехники было доложено:

«1) Предложение т. Проскурякова К.Н. к Межведомственному техническому совету по АЭС по уточнению существующей концепции о максимальной проектной аварии (МПА) является правильным. Предполагаемое автором исходное событие и путь развития аварии потенциально возможны и должны быть проанализированы Научным руководителем, Главным конструктором и Генеральным проектировщиком АЭС. 2). Автор предложений

справедливо указывает на необходимость ускорения внедрения системы непрерывной диагностики эксплуатируемого оборудования с использованием в частности контроля состояния теплоносителя. 3). Следует форсировать работы по выполнению предложений к Минприбору и Минэнерго по оснащению АЭС средствами виброакустической диагностики. 4) Госатомнадзор поддерживает рекомендации т. Проскуракова К.Н. Минвузу СССР о необходимости создания специализации "Диагностика технического состояния АЭС и обслуживание систем надежности и безопасности". К сожалению, осуществлению этих рекомендаций помешала происходившая в стране перестройка. Финансирование научной группы кафедры АЭС, которая работала в новом не имевшем аналогов научном направлении «Создание методов диагностики, прогнозирования и предотвращения виброакустических резонансов в оборудовании АЭС» было прекращено.

Фундаментальные исследования проведенные в МЭИ показывают, что в оборудовании АЭС присутствуют скрытые закономерности и динамические процессы, которые проявляются в виде автоколебаний, параметрических резонансов, резонансных взаимодействий колебаний теплоносителя с колебаниями оборудования. Во многих случаях благодаря существованию этих физических явлений и процессов происходят внезапные отказы оборудования и аварии. Анализ показывает, что опередившие в свое время текущие потребности ядерной энергетики исследования, проведенные в МЭИ, в настоящее время имеют актуальное значение. Отметим, что рекомендации по раннему обнаружению вскипания теплоносителя в активной зоне реакторов типа WWER и PWR были опубликованы до аварии на АЭС «Три - Майл Айленд-2» (США) [9].

Об актуальности в настоящее время этого направления в решении практических задач свидетельствует то, что в базу данных «WorldWideScience.org», разработанного департаментом США, Управлением энергетики научной и технической информации к 2015 г. включено более 10 публикаций кафедры АЭС. Как известно, WorldWideScience.org реализует охват глобальных научно-исследовательских результатов и является глобальной научной базой данных и поисковых систем, предназначенных для ускорения научных открытий и прогресса за счет ускорения обмена научными знаниями. Эта глобальная научная база данных предназначена способствовать сотрудничеству и обмену идеями между исследователями.

И наконец, по поводу последней тяжелой аварии на АЭС «Фукусима Дайичи». По официальным данным, авария произошла из-за того, что дизель - генераторы, обеспечивающие аварийное охлаждение активной зоны, пострадали в результате цунами. Однако, в ряде публикаций и бесед с персоналом станции, попавших в интернет, содержится информация о том, что наблюдались течи теплоносителя, которые возникли в результате землетрясения, ещё до прихода цунами. Проверить правдоподобность этой версии в настоящее время не представляется возможным. Ввиду этого официальная версия способна вуалировать иную вероятную первопричину нарушения охлаждения активной зоны и таким образом игнорировать версию резонансного усиления сейсмических воздействий, произошедшего при совпадении частот сейсмических волн с частотой акустических колебаний в кипящем реакторе. По нашему мнению следует провести исследования реактора типа BWR в качестве объекта, обладающего свойствами резонатора Гельмгольца.

В настоящее время достоверное прогнозирование возникновения виброакустических резонансов при тяжелых авариях на АЭС является неразрешимой задачей, поскольку планировать и осуществлять на энергоблоке аварийную ситуацию для измерения вибрации оборудования неприемлемо. В этих условиях использование, разработанных и апробированных на АЭС, моделей и алгоритмов расчета частот АСВ для прогнозирования и предотвращения возникновения виброакустических резонансов при авариях с течами теплоносителя и при ударных воздействиях и землетрясениях, может быть своевременным и полезным.

Актуальными задачами, на сегодняшний день, являются расчёт частот АСВ теплоносителя в стационарных и переходных режимах. Известно, что экспериментальные

методы исследований, проводимых в условиях лабораторий и АЭС, не во всех случаях в полной мере воспроизводят особенности взаимодействия АЭС с сейсмическими нагрузками, ввиду чего прогнозируемые результаты могут существенно отличаться от действительных. Одной из главных причин такого несоответствия является отсутствие результатов экспериментальных исследований на натурном объекте. Такие исследования позволили бы обосновать сейсмостойкость АЭС с учетом их особенностей, главными из которых являются нейтронно-физические и тепло-гидравлические процессы в условиях наложения на них внешних динамических сил, одновременно воздействующих на все строительные и технологические системы.

Большое значение для обеспечения сейсмостойкости объектов ядерной энергетики имеет многолетний российский опыт расчетно-экспериментального обоснования сейсмостойкости АЭС [17]. В одной из последних работ [18], обобщающей опыт динамических испытаний оборудования непосредственно на энергоблоках, приведено обоснование сейсмической безопасности АЭС с использованием метода динамических испытаний, разработанного в ОАО ВНИИАМ, запатентованного и одобренного МАГАТЭ. Однако, до настоящего времени проведение обоснования сейсмической безопасности с использованием динамических испытаний не принимается как обязательное для всех российских АЭС, и данные работы проводятся лишь в инициативном порядке при наличии поддержки со стороны руководства АЭС. В работе [19] разработана комплексная программа по всестороннему изучению и анализу вибронпряженного состояния оборудования, его внутри корпусных устройств и трубопроводов АЭС. Программа включает в себя измерения вибронпряженного состояния оборудования и трубопроводов, определение запаса прочности в стационарном состоянии и переходных режимах.

Следует подчеркнуть, что в материалах [17 – 19] не рассматривается возможность усиления вибраций оборудования в системах охлаждения реактора при возникновении виброакустических резонансов, в результате чего при обосновании сейсмостойкости АЭС не учитывается возможность превышения проектного уровня вибраций оборудования при воздействии внешних периодических нагрузок, вызванных землетрясением.

Игнорирование возможности возникновения виброакустических резонансов с сейсмическими волнами в оборудовании АЭС объясняется отсутствием в российской и зарубежной нормативной документации требований проведения количественного определения СЧКДТ в оборудовании АЭС в эксплуатационных и аварийных режимах и, следовательно, отсутствием нормативов для предотвращения резонансного взаимодействия вибраций оборудования АЭС с упругими волнами в теплоносителе.

На кафедре АЭС МЭИ и на Нововоронежской АЭС для прогнозирования условий возникновения виброакустических резонансов в оборудовании и их предотвращения применяется междисциплинарный подход с использованием аналитических и полуэмпирических методик. Заслуживают также внимания известные современные методы исследования и расчётов с использованием компьютерных технологий [20].

При исследовании резонатора важно учитывать воздействие вихревого течения в его тракте. Для чего целесообразным является применение методик конечно-элементного моделирования, с использованием которых проводится расчетное обоснование схемы гасителя и оптимальных значений его акустических характеристик. Подобный метод применяет компания Ageva, в публикации [19] отмечается, что при оценке и прогнозировании ресурса необходимо учитывать гидродинамическое и акустические параметры потока теплоносителя, а также текущее состояние контактов оборудования с его внутрикорпусными устройствами и со строительными конструкциями. Недостатком данного подхода является привязанность результатов к текущему состоянию, затрудняющего прогнозирование ресурса, сложность и высокая стоимость проведения оценочных расчётов.

В отличие от указанного подхода авторами предложен альтернативный вариант обеспечения несущей способности конструкции оборудования ядерной установки, предусматривающий предотвращение условий возникновения максимально возможных

динамических нагрузок, вызванных виброакустическим резонансом. В качестве наиболее эффективного средства предотвращения виброакустических резонансов предлагается использование акустического фильтра частот, типа резонатора Гельмгольца. Данное устройство будет обеспечивать подавление акустических колебаний теплоносителя совпадающими с частотами вибраций оборудования, вынужденными колебаниями давления, вызванными работой ГЦН или внешними ударными и сейсмическими воздействиями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны методы расчета акустических параметров теплоносителя в эксплуатационных и аварийных режимах АЭС.

Методы могут быть применены для прогнозирования и предотвращения возникновения виброакустических резонансов в оборудовании АЭС в эксплуатационных и аварийных режимах, а также при сейсмических и ударных воздействиях.

Для предотвращения виброакустических резонансов на АЭС предложено использовать гасители акустических колебаний типа резонатора Гельмгольца, характеристики которого определяются с использованием современных компьютерных технологий.

Приведенные результаты свидетельствуют об актуальности, для повышения безопасности и конкурентоспособности АЭС, продолжения научно исследовательских работ, в новом, созданном на кафедре АЭС МЭИ, научном направлении «Прогнозирование, диагностика и предотвращение виброакустических резонансов в оборудовании АЭС».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Проскуряков К. Н. Автоколебания в одиночном парогенерирующем канале // Теплоэнергетика. - 1965. - № 12. - С. 75 - 77.
2. Tong L.S. Boiling crisis and critical heat flux. Westinghouse Electric Corporation. Published by Atomic Energy Commission office of information services.1972.
3. Информация об аварии на Чернобыльской АЭС и её последствиях, подготовленная для МАГАТЭ. Атомная энергия. Т.61. Вып.5, ноябрь 1986. С. 301 - 320.
4. Проскуряков К. Н. Электрическая модель парогенерирующего канала. М.: Труды МЭИ, вып. № 126, 1972.
5. Проскуряков К. Н. Условие возникновения колебаний в парогенерирующем канале. Кэрнэнергия I №5, 1975. (на немецком яз.)
6. Van Blarcom P.P., Smitt R.D. Flashing fluids at low pressures // Proc. ISA Conf. And Exhib. - Chicago, 1979. - P. 391-40
7. Овчинников В.Ф., Смирнов Л.В. Колебания трубопроводов с нестационарным потоком жидкости. // Вопросы атомной науки и техники. Физика и техника ядерных реакторов. -1981. - Вып. 2. - С.3-11
8. Веземский В.Г., Смирнов Л.В., Овчинников В.Ф., Яскеляин А.В. Влияние режимов работы контуров циркуляции АЭС с ВВЭР-1000 на надежность парогенераторов ПГВ-1000// Теплоэнергетика. - 1998. - №5. - С.36-41.
9. Теоретическое определение частот собственных колебаний теплоносителя в первом контуре АЭС / К. Н. Проскуряков, студенты: С. П. Стоянов, Г. Нидцбалла, А. В. Грязев и др.// Тр. МЭИ. - 1979. - Вып. 407. - С. 87 - 92.
10. Mullens L. A., Thie J. A. Understanding Pressure Dynamic Phenomena in PWRs for Surveillance, Diagnostic Application // Proceedings of 5-th Power Plant Dynamics, Controls, Testing Symposium University of Tennessee. - Knoxville, March 1983.
11. Por G., Izsak E.t Valka S. Some Results of Noise Measurements in PWR NPP // Progress in Nuclear Energy. - 1985. - № 15. - P. 387.
12. Nagy I., Katona T. Theoretical Investigation of the Low-Frequency Pressure Fluctuation in PWRs // Progress in Nuclear Energy. - 1985. - № 15. - P. 651 - 659.
13. Проскуряков К. Н., Устинов А. К. Создание научной базы акустической диагностики теплогидравлических процессов в оборудовании АЭС // Вестник МЭИ.- 1996. -№3 - С. 51-61.

14. Proskuryakov K.N., Early Boiling Detection Method OF Pre-or Post-Accident Situation on WWER and RBMK, SMORN VII, Avignon, France, 19-23 June 1995. Vol. 1, pp. 426-424
15. Проскуряков К.Н. Теплогидравлическое возбуждение колебаний теплоносителя во внутрикорпусных устройствах ЯЭУ. - М.: МЭИ, 1984, 67 с.
16. Фомичев М. С. Экспериментальная гидродинамика ЯЭУ: Энергоатомиздат, 1989. - 247 с.
17. Анализ современных российских и зарубежных подходов к оценке сейсмостойкости оборудования АЭС в условиях эксплуатации / П.С. Казновский, К.Г. Касьянов, А.Д. Емельянова, А.П. Казновский, С.И. Рясный // Материалы VIII Междунар. науч. техн. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». Подольск. 28–31 мая 2013 г
18. Натурное экспериментальное обоснование и обеспечение эксплуатации АЭС / С.И. Рясный, П.С. Казновский, Э.С. Сааков, Ю.В. Саунин, В.У. Хайретдинов, А.К. Адаменков // Материалы VII Междунар. науч. техн. конф. “Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР”. Подольск. 17–20 мая 2011 г
19. ANP-10306NP. Comprehensive vibration assessment program for U.S. EPR reactor internals. Technical report. 2013.
20. Акустика пневмо- и гидромашин [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / М. С. Гаспаров, А. А. Иголкин, А. И. Кох, А. И. Сафин; Ми-нобранауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Электрон. текстовые и граф. дан. (21,4 Мбайт). - Самара, 2012. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM).
21. Lari Kela. Attenuating amplitude of pulsating pressure in a low-pressure hydraulic system by an adaptive Helmholtz resonator // Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, University of Oulu, P.O.Box 4200, FI-90014 University of Oulu, Finland. Acta Univ. Oul. C 354, 2010.